

國家科學叢書

工程動力學

(第三版)

Irving H. Shames 著

葉世禎 譯

third edition

**ENGINEERING
MECHANICS**

**VOLUME II
DYNAMICS**

ENGINEERING MECHANICS
(DYNAMICS)

工程動力學

原著者：Irving H. Shames
譯者：葉世禎

國家書店有限公司印行

有著作權
不准翻印

工程動力學 (第三版)

定價：新台幣貳佰元整

原著者：Irving H. Shames

譯者：葉世禎

總策劃：林洋慈

發行人：林大坤

發行者：國家出版社

總經銷：國家書店有限公司

郵撥：一〇四八〇一帳戶

公司：台北市新生南路一段126之8號三樓

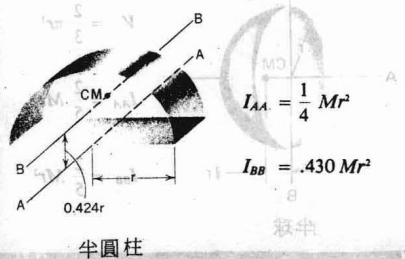
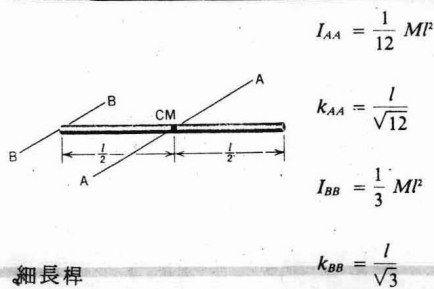
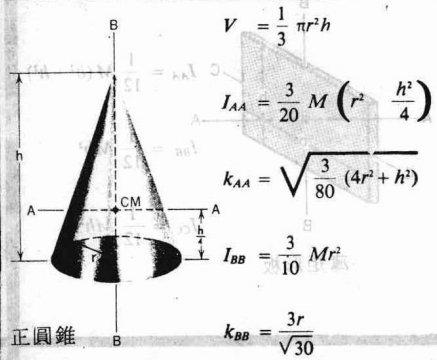
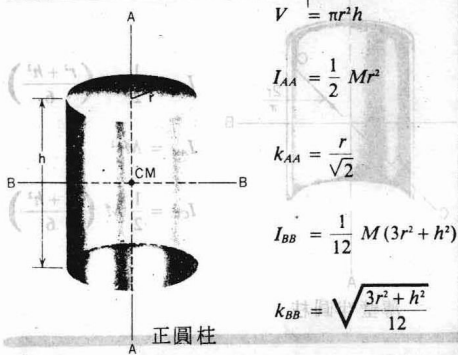
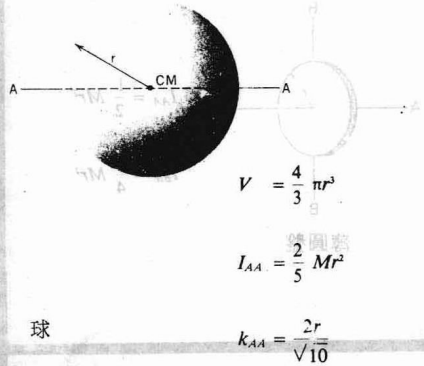
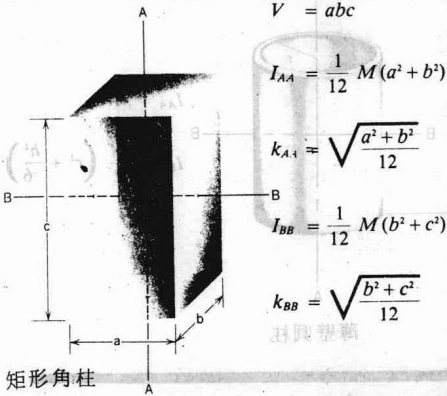
電話：3912425・3926748-9

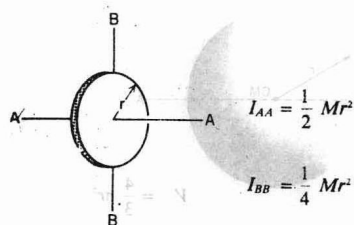
印刷所：東遠印刷廠

1983年12月初版

行政院新聞局局版台業字第零陸叁貳號

各種均勻固體的性質

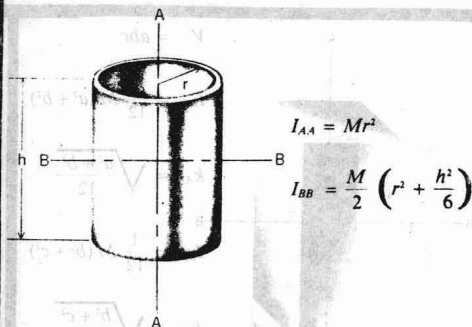




$$I_{AA} = \frac{1}{2} Mr^2$$

$$I_{BB} = \frac{1}{4} Mr^2$$

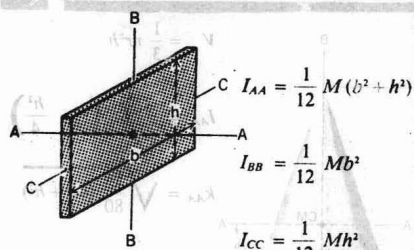
薄圓盤



$$I_{AA} = Mr^2$$

$$I_{BB} = \frac{M}{2} \left(r^2 + \frac{h^2}{6} \right)$$

薄壁圓柱

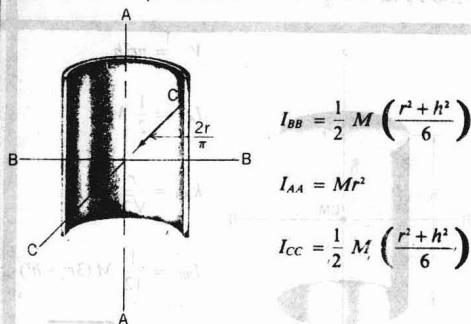


$$I_{AA} = \frac{1}{12} M(b^2 + h^2)$$

$$I_{BB} = \frac{1}{12} Mb^2$$

$$I_{CC} = \frac{1}{12} Mh^2$$

薄矩形板

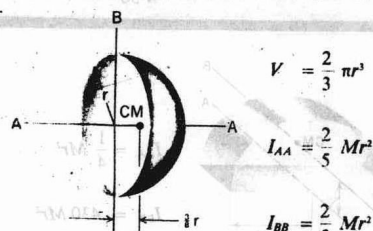


$$I_{BB} = \frac{1}{2} M \left(\frac{r^2 + h^2}{6} \right)$$

$$I_{AA} = Mr^2$$

$$I_{CC} = \frac{1}{2} M \left(\frac{r^2 + h^2}{6} \right)$$

薄壁半圓柱



$$V = \frac{2}{3} \pi r^3$$

$$I_{AA} = \frac{2}{5} Mr^2$$

$$I_{BB} = \frac{2}{5} Mr^2$$

半球

各因次間的關係

長度	$1 \text{ m} \equiv 3.281 \text{ ft} \equiv 39.37 \text{ in.}$
	$1 \text{ mi} \equiv 5280 \text{ ft} \equiv 1.609 \text{ km}$
	$1 \text{ km} \equiv .6214 \text{ mi}$
時間	$1 \text{ hr} \equiv 60 \text{ min} \equiv 3600 \text{ sec}$
質量	$1 \text{ kg} \equiv 2.2046 \text{ lbm} \equiv .068521 \text{ slug}$
力	$1 \text{ N} \equiv .2248 \text{ lbf}$
	$1 \text{ dyne} \equiv 1 \mu\text{N}$
速率	$1 \text{ mi/hr} \equiv 1.609 \text{ km/hr} \equiv 1.467 \text{ ft/sec}$
	$1 \text{ km/hr} \equiv .6214 \text{ mi/hr}$
	$1 \text{ knot} = 1.152 \text{ mi/hr} \equiv 1.853 \text{ km/h.}$
	$\equiv 1.689 \text{ ft/sec}$
能量	$1 \text{ J} \equiv 1 \text{ N-m}$
	$1 \text{ Btu} \equiv 778.16 \text{ ft-lbf} \equiv 1.055 \text{ kJ}$
	$1 \text{ watt-hour} \equiv 2.778 \times 10^{-4} \text{ J}$
體積	$1 \text{ gal} \equiv .16054 \text{ ft}^3 \equiv .0045461 \text{ m}^3$
	$1 \text{ liter} \equiv .03531 \text{ ft}^3 \equiv .2642 \text{ gal}$
功率	$1 \text{ w} \equiv 1 \text{ J/S}$
	$1 \text{ hp} \equiv 550 \text{ ft-lb/sec} \equiv .7068 \text{ Btu/sec}$
	$\equiv 746 \text{ w}$

譯 序

此部工程力學鉅著譯自 I. H. Shames 教授之原著。本人執筆之先即知此書爲無匹之選，待沈浸其字裏行間更時爲其高明而拍案叫絕。

原作者積多年之教學、著述經驗，遣辭平易順暢，內容均顧前後相銜，例題、習題包羅廣大。全書幾無贅言，可謂字字珠璣。讀之非但得親工程力學之全貌，更益增各種工程常識，並奠立後繼各種力學之初步概念。竊以爲不論初學或求溫故知新均可以此書爲工程力學範本。蓋時下坊間版本雖多，而較諸內容、舉例、習題等，實少有出其右者。

本人學識、經驗俱屬有限，譯本錯誤恐難避免，尙祈各先進賢達惠予指正爲荷！

原 序

本人撰寫動力學第三版之主因在使其理論簡化及現代化，並使內容更切實際而深入。此外，也尋求使本書俱有不同的範圍與深度以祈適合當今各種工程計劃。這些修改是源於本人近六年來對由 100 到 300 名來自各界的學生所組成的大型編班所傳授的力學教學。

第三版中主要的變更可概述如下：

1. 新增了多於四成的習題，都是一些有趣、實際而且典型的問題。其餘的也是由第二版的習題中擇其精華而成。並且各章的習題由原來列於章末移到各章中適當的位置。在各章結束處，列入約10個問題，都是該章的主要觀念與技巧的代表，稱之為“複習題”。本人籲請各指導教授切勿以這些問題作為教材，而應留予學生作為準備考試之用。所有複習題的解答均列於書底。其他的習題則只列入偶數題的答案。在靜力學與動力學開始的部份，習題中有五成是使用 SI 單位。這比率隨後逐章提高到百分之65至70。
2. 在第三版中有一章專門討論平面運動 (plan motion)，除非指導教授有意講解，否則大可不必急於討論困難的三維尤拉方程式。本人並非僅將大一物理改寫，而是包羅所有物體的任意旋轉問題，並且為三維尤拉方程式（此方程式在本書中另成一節，並且加注星號）的問題作準備。
3. 在17章中加強剛體角衝量與動量的份量。其中有些資料在以前的版本未曾出現過。但是，因為本人將一些次要的或特別困難的資料刪除或納入習題中，所以整個課文並未因新資料的加入而顯得較冗長。例題則包括電子彈道學、高速旋轉陀螺，以及旋轉羅盤 (gyrocompass)

2 工程動力學

4. 本書曾作最大的彈性安排，以適合各位教授的不同興趣與重點。為此，本人在這一版中加上星號的章節要比前一版為多，這些章節可以刪除而不失全書的連續性。若其中有任何內容為以後授課所需，則均將在適當地地方濃縮重述。例如12章的太空力學中有關軌道的討論就加註星號，如果授課者決定跳過本節，則仍可在14章中未加註星號各節裏利用能量法與角動量處理太空力學問題。屆時將提出一些簡短的介紹，以使未曾在12章中研讀完整軌道理論的同學有足夠的完整背景。另一個例子是，在第10章中的虛功法裏所出現的保守力資料，在13章中討論能量法時再度出現，並且未加星號。最後，有些資料是以小寫字體印刷，這些雖然無法在課堂中講述，但對讀者而言可能會是一些有趣而實用的內容。
5. 大體說來，我對第二版曾作徹底檢討，並將其中大部份重寫使其更明確、更簡化。本人有幸蒙獲在南衛理公會大學（Southern Methodist University）任教的Robert M. Jones博士為我校稿，包括各習題在內。逐行校對各種遣詞、用語的明晰和通順。

以下為本書的詳細內容描述，並且進一步說明第三版中所作的變更。

首先在11章中計算在卡氏座標、圓柱座標、及路徑座標等單一座標系下的向量導數。然後提出單一座標下的單一質點運動學。接下來則是相對運動的觀念，但是範圍有限，直到第15章討論彼此相對平移的座標系時再進一步闡述。此時只能謹慎定義一個質點所謂的“相對於一點”運動。12章是質點直線平移、中心力運動、以及其他曲線運動的動力學。振動的觀念在此處建立並且留待19章中詳細討論。該章以質點系的討論結尾，並且由質心觀念使我們更加了解我們常用的質點觀念。在13、14章中，分別以能量法及線性動量法處理質點與質點系。在14章之末，基於連續性，利用 $M = \dot{H}$ 方程式檢討一些以前在物理課程中出現過的簡單的、剛體的平面運動問題。此處所用的剛體運動學公式和以前所用的相同。這些簡單的問題啟發了15章的剛體運動學。

15 章提出Chasle 定理，使11章中所述之相對運動關係擴展，以涵蓋座標系之間彼此任意相對運動的一般狀況。所以這一章等於結束了質點動力學（除了振動之外），同時構成處理剛體運動力學的基礎。在16章中，先以最簡的形式討論平面運動的動力學，再進入平常的形式。附錄中有一部份是第九章的慣性張量，供同學參考。我們考慮旋轉物體的平衡。在17章中，以剛體的能量法及衝量—動量法作為13章與14章處理質點問題的延伸。根據我們在水牛城執教的經驗，我們發現在此處可以先發展一般三維公式，再解決許多二維及三維問題。本人相信這種方法可以節省許多時間，並且更求能求得通盤了解。

在第18章中，主要針對一般運動剛體的 $M = H$ 方程式。同時特別提出非常實用的尤拉方程式。我們以一種非常謹慎的方法正確而有效地使用尤拉方程式解決範圍甚廣的三維問題。另外在一系列例題中也介紹尤拉角（Euler angle）、以及各種迴轉儀。最後，在加註星號那節裏，發展無扭矩運動。在最後的19章中，我們討論單一自由度的振動並簡短地介紹多自由度系統。

在本書第一版中，曾有一章專論可變形介質（多數為流體）的動量法。這種內容在目前許多力學課本中均有討論。但是本人却將其刪除，因為據第二版的經驗顯示，這種內容最好留在流體力學中。屆時不僅可根據動量，同時可根據連續性以及熱力學第一定律討論控制體積（control volume）。

在第三版撰寫過程中幸賴幾位先生鼎力支持。首先我要感謝南衛理公會大學的Robert M. Jones 博士。他仔細審閱包括習題在內的動力學全冊，使本書能明晰通暢。

同時我也有幸榮獲喬治亞工業技術學院的David Mc Gill 及Wilton King 教授的校對。由於他們的先知，使我能改進本書。在此謹對兩位先生致以最深的謝意。海軍學院的William Lee 教授替我把全書包括習題全部逐行詳細檢查。其建議殊堪採用，本人也願藉此來達謝忱。密西根大學的

4 工程動力學

I. Mc Ivor 教授及匹茲堡大學的 J. S. Chen 教授，俄亥俄州立大學的 W. E. Clausen 教授亦幫忙代為校稿，也在此一併致謝。另外要感謝在水牛城的諸位同事，P. Culkowski 教授，C. Fogel 教授，R. Mates 教授，S. Prawel 教授，T. Ranov 教授及 H. Reismann 教授。在教導不同的力學課程班級時，他們給我持續的支持以及頗俱實價的協助。最後感謝 K. Ward 太太及 G. Huck 太太卓越的打字表現。

目 錄

第十一章 質點之運動學—簡單相對運動

11.1 引 言.....	1
11.2 向量對時間的微分.....	2
第二部份：速度與加速度的計算.....	4
11.3 重點簡介	4
11.4 垂直分量	5
11.5 以路徑變數表示的速度與加速度	13
11.6 圓柱座標	30
第三部份：簡單的運動關係與應用	43
11.7 簡單相對運動.....	43
11.8 結 論.....	55

第十二章 質點動力學

12.1 引 言.....	61
第一部份：直角座標、直綫平移.....	62
12.2 直角座標的牛頓定律.....	62
12.3 直綫平移.....	62
12.4 短 評.....	75
第二部份：圓柱座標，中心力運動.....	85
12.5 圓柱座標之牛頓定律.....	85
12.6 中心力運動—引言.....	87

2 工程動力學

*12.7 引力中心力運動.....	89
*12.8 應用於太空力學.....	95
第三部份：路徑變數.....	115
12.9 路徑變數的牛頓定律.....	115
第四部份：質點系.....	117
12.10 質點系之一般運動.....	117
12.11 結 論.....	126

第十三章 質點的能量法

第一部份：單一質點的分析.....	131
13.1 引 言.....	131
13.2 功率法.....	138
13.3 保守力場.....	153
13.4 機械能守恒.....	157
13.5 功 - 能方程式的另一種形式.....	161
第二部份：質點系.....	172
13.6 功 - 能方程式.....	172
13.7 以質心為基礎的動能表示式.....	175
13.8 以質心為基礎之功 - 動能表示式.....	179
13.9 結 論.....	187

第十四章 質點的動量法

第一部份：綫性動量.....	191
14.1 質點的衡量與動量關係.....	191
14.2 質點系的綫性動量研究.....	196
14.3 衝 力.....	201

14.4 衝 擊	215
*14.5 質點與巨大剛體的碰撞	220
第二部份：動量矩	232
14.6 單一質點之動量矩方程式	232
14.7 質點系之動量矩方程式	243
14.8 結 論	260

第十五章 剛體運動學：相對運動

15.1 引 言	267
15.2 剛體之平移與旋轉	267
15.3 Chasle 定理	269
15.4 固定於運動座標的向量導數	271
15.5 固定向量觀念的應用	285
*15.6 不同座標的向量時間導數之間的關係	304
*15.7 質點在不同座標的速度關係	306
*15.8 質點在不同座標的加速度	320
*15.9 牛頓定律新觀	335
*15.10 科氏力	339
15.11 結 論	347

第十六章 剛體平面運動的動力學

16.1 引 言	351
16.2 動量矩方程式	351
16.3 迴轉體對其第一迴轉軸的純粹旋轉	355
16.4 具有四個正交對稱面物體的純旋轉	361
16.5 厚板狀物體的純旋轉	364
16.6 振動的厚板狀物體	378

4 工程動力學

16.7 厚板狀物體的一般平面運動	384
16.8 任意剛體之純旋轉	405
*16.9 平 衡	409
16.10 結 論	418

第十七章 剛體的能量法與衝量—動量法

17.1 引 言	423
第一部份：能量法	423
17.2 剛體的動能	423
17.3 功—能關係	430
第二部份：衝量—動量法	452
17.4 剛體對其體內任意點之角動量	452
17.5 衝量—動量方程式	456
17.6 衝力與衝扭矩：偏心衝擊	474
17.7 結 論	489

*第十八章 一般剛體運動的動力學

18.1 引 言	493
18.2 尤拉運動方程式	494
18.3 尤拉方程式之運用	497
18.4 剛體平衡之必要與充分條件	515
18.5 對一固定點的三維運動；尤拉角	516
18.6 利用尤拉角的運動方程式	521
*18.7 無扭矩運動	534
18.8 結 論	550

第十九章 振動

19.1 引 言	555
19.2 自由振動	555
19.3 扭轉振動	568
*19.4 其他自由振盪運動的例子	579
*19.5 能量法	582
19.6 綫性恢復力以及與時間成正弦曲綫變化的力	587
19.7 俱黏性阻尼之綫性恢復力	599
*19.8 綫性恢復力，黏性阻尼與諧和干擾	607
*19.9 多自由度的振動系統	614
19.10 結 論	624

附 錄

I 主慣性矩之計算	629
II 橢圓的其他數據	631
III 證明無限小旋轉為向量	633

習題解答

索 引

第十一章 質點的運動學—簡單相對運動

Kinematics of a particle—Simple Relative Motion

11—1 引言

運動學 (Kinematics) 研究質點與剛體的運動現象，不考慮造成運動的原因為何。運動學可當成運動的幾何學。運動學一旦精通，即可順利掌握造成運動的因素以及運動本身之間的關係。後面所研究的範圍稱為動力學 (Dynamics) 動力學可簡單地區分成以下幾個部份，其中大部份將在本書中討論：

1. 單一質點的動力學。(我們已在靜力學中提過，質點是一個理想化的東西，不俱體積却有質量。)
2. 一群質點的動力學。這承接上一部份，並構成連續媒質 (Continuous media) 運動的基礎，如流體流 (Fluid flow) 及剛體運動。
3. 剛體的動力學。這是力學中重要的一環，本書將有詳細討論。
4. 一組剛體的動力學。
5. 連續可變形介質的動力學。

由以上的敘述，顯見質點在動力學中扮演了非常重要的角色。但是質點間是以什麼連接？何者為完全的假設觀念？還有在物理問題中所遭遇的有限物體為何？其關係簡言之為：在許多問題裏，物體的大小、形狀與其運動某些方面的討論無關；在這些計算中只注重物體的質量。例如在拖一部卡車上山時（如圖 11.1），我們將只關心卡車的重量，而非其形狀與大小（若不計風力及車輪的旋轉效果，等等）。在計算施力時可把卡車當成一個質點。

我們可以更精確地把這種關係表達如下。在下章中（12.10 節）將可